

Simulacija brzog pražnjenja plinske boce *Simulation of Rapid Discharge from a Gas Cylinder*

Z. Virag¹, A. Galović¹, M. Živić^{2,*}

¹Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, Hrvatska

²Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Slavonski Brod, Hrvatska

*Autor za korespondenciju. E-mail: mzivic@sfsb.hr

Sažetak

U radu je razvijen matematički model brzog pražnjenja standardne plinske boce napunjene propanom. Matematički model je razvijen uz pretpostavku izentropskog istrujavanja plina iz boce kroz ugrađenu konvergentnu mlaznicu. U najužem (izlaznom) presjeku mlaznice može se ovisno o trenutnom tlaku u boci uspostaviti ili okolišni ili kritični tlak. Razvijeni model je integriran Runge-Kutta metodom četvrtog reda točnosti, a rezultati integracije uključuju vremensku promjenu temperature plina u boci i masenog protoka kroz mlaznicu te preostale količine plina u boci. Zaključuje se da kod vrlo brzog pražnjenja toplinski izolirane boce dolazi do prekida istrujavanja plina iz boce iako u njoj još ima plina. Do potpunog pražnjenja boce će doći u slučaju zagrijavanja plina, a vrijeme pražnjenja se smanjuje s povećanjem toplinskog toka.

Abstract

A model of rapid discharge from a conventional gas cylinder filled with propane is developed in the work. The isentropic flow of gas from the cylinder through a convergent nozzle into atmosphere was assumed. Depending on the vessel pressure, the pressure in the outlet cross-section of the nozzle can be either critical or environmental. The developed model is integrated using the fourth order Runge-Kutta method and the results of integration include the time change of the temperature of the gas in the cylinder and the mass flow through the nozzle and the remaining amount of the gas in the cylinder. It is concluded that in the case of rapid discharging of the insulated cylinder the gas flow from the cylinder stops when the vapor pressure falls at the atmospheric pressure, even though there is some gas in the cylinder. Complete cylinder discharging occurs when the gas is heated and the total discharge time reduces with the increase of the heat flux.

Ključne riječi: vrijeme pražnjenja, adijabatski i neadijabatski uvjeti, vremenska promjena temperature plina, vremenska promjena mase plina u boci

1. Uvod

Plinska boca sadrži ukapljeni naftni plin, najčešće smjesu propana i butana, pod tlakom i kao takva podliježe uvjetima sigurnosti koji su dani u propisima o posudama pod tlakom. Te se boce najčešće koriste u domaćinstvima i stoga je od velike važnosti ispravnost posude zajedno s njezinim priključcima na odgovarajuće trošilo. Nepoželjno (nekontrolirano) istjecanje plina iz posude može dovesti do eksplozije plina u prostoru, a što može imati za posljedicu ljudska stradanja i materijalnu štetu na objektu.

Stoga se, nakon havarije s bocom zbog curenja plina, najčešće prilazi istraživanju uzroka neželjenog curenja plina iz posude. Brzina istjecanja plina iz posude izravno utječe na vremensku promjenu temperature plina u posudi. Što je ta brzina veća, dolazit će do bržeg smanjenja temperature plina u posudi, pa se pri dostatnoj brzini istjecanja plina iz posude, na njezinoj vanjskoj površini može pojaviti kondenzirana pa čak i smrznuta vlaga iz zraka u prostoru u kojem se nalazi boca. Pri brzom istjecanju plina iz posude pod tlakom, ako je posuda velika, temperatura fluida u posudi može biti tako niska da temperatura stijenke posude padne ispod temperature prijelaza iz žilavog u krhko područje, [1].

Sporo, kontinuirano istjecanje plina iz posuda pod tlakom, koje se javlja u normalnim radnim uvjetima, je istraženo i opisano u literaturi. Xia i ostali [2] su opisali polu empirijski model s konstantnim toplinskim ponorom u fluidu kako bi simulirali entalpijski gubitak nastao istjecanjem mase iz posude. Zhou i ostali [3] su postavili jednostavan model s istjecanjem mase i izveli njegovo analitičko rješenje, a u radu [4] Zhou raspravlja o razlikama između modela s toplinskim ponorom i modela s istjecanjem mase.

Haque i ostali [1] su izvršili analitičko i eksperimentalno istraživanje brzog pražnjenja velike posude i prikazali vremensku promjenu temperature fluida i temperature stijenke, kao i polje temperature zasićene pare unutar posude.

Cilj ovoga rada je analizirati brzinu pražnjenja standardne plinske boce, primjenom modela s koncentriranim parametrima u kojem se pretpostavlja ravnotežna promjena stanja u boci. Model će se riješiti numerički, a rješenje modela će dati brzinu promjene tlaka i temperature plina u boci i brzinu smanjenja mase plina u boci, odnosno ukupno vrijeme potpunog pražnjenja boce.

2. Matematički model i numerički postupak

Analizira se problem pražnjenja plinske boce, ukupnog volumena $V=24,7$ l, koja je u početnom trenutku ispunjena propanom, pri čemu kapljevita faza okolišnje temperature T_0 , zauzima volumen V_k i koja se prazni kroz potpuno otvoreni ventil površine otvora $A=15$ mm². Tijekom pražnjenja boce, temperatura i tlak u boci opadaju, te se kroz plašt boce izmjenjuje toplinski tok koji se modelira pomoću prosječnog koeficijenta prolaza topline k , u obliku $kA_p(T_0 - T)$, gdje je $A_p=0,48$ m² površina plašta boce kroz koji se izmjenjuje toplina, a T trenutna temperatura kapljevite i parovite faze propana u boci. Pretpostavlja se izentropsko strujanje idealnog plina (plinska konstanta $R=188,6$ J/(kg·K), omjer specifičnih toplinskih kapaciteta $\kappa=1,1$) kroz ventil u atmosferu gdje vlada tlak $p_a=101325$ Pa. Pretpostavlja se kvazistacionarni proces u boci, tj. da u svakom trenutku u boci vladaju ravnotežni uvjeti i da

je brzina parovite faze u boci zanemariva, pa je tlak p u boci jednoznačno definiran trenutnom temperaturom T . Maseni protok plina kroz ventil se računa po formuli:

$$q_m = \frac{w_m A}{V_m} \quad (1)$$

pri čemu su tlak, Machov broj i apsolutna temperatura u grlu mlaznice jednaki

$$\rho_m = \begin{cases} \rho_a & \text{za } \rho_a \geq \rho_{kr} \\ \rho_{kr} = \rho \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} & \text{za } \rho_a < \rho_{kr} \end{cases} \quad (2)$$

$$M = \sqrt{\frac{2}{\kappa - 1} \left[\left(\frac{p}{p_m} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} - 1 \right]} \quad (3)$$

$$T_m = \frac{T}{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2} \quad (4)$$

a specifični volumen i brzina u grlu mlaznice su

$$V_m = \frac{RT_m}{p_m} \quad (5)$$

$$w_m = M \sqrt{\kappa RT_m} \quad (6)$$

Promjena stanja plina u boci definirana je zakonom očuvanja energije i mase, koji glase

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{V_k}{v'} u' + \frac{V - V_k}{v''} u'' \right] = -q_m h'' + k A_p (T_0 - T) \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{V_k}{v'} + \frac{V - V_k}{v''} \right] = -q_m \quad (8)$$

gdje je t vrijeme, v' i v'' su specifični volumeni kapljevite i plinovite faze (tj. vrele kapljevine i suho zasićene pare), u' i u'' su specifične unutarnje energije tih dviju faza, a h'' specifična entalpija suho zasićene pare. S obzirom da su v' , v'' , u' i u'' funkcije temperature, a da je temperatura funkcija vremena primjenjuje se pravilo lančanog deriviranja

$$\frac{dv'}{dt} = \frac{dv'}{dT} \frac{dT}{dt}, \quad \frac{dv''}{dt} = \frac{dv''}{dT} \frac{dT}{dt}, \quad (9)$$

$$\frac{du'}{dt} = \frac{du'}{dT} \frac{dT}{dt}, \quad \frac{du''}{dt} = \frac{du''}{dT} \frac{dT}{dt}. \quad (10)$$

Tablica 1 prikazuje zavisnost tlaka zasićenja, specifičnih volumena i entalpija vrele kapljevine i suhozasićene pare propana od temperature.

Tablica 1. Podaci za propan (tlak zasićenja, specifični volumeni i entalpije za vrelu kapljevinu i suho zasićenu paru), [5].

$\theta = T - 273,15$ °C	p bar	v' m ³ /kg	v'' m ³ /kg	h' kJ/kg	h'' kJ/kg
-100	0,028885	0,001553	11,269	-23,551	456,88
-95	0,043638	0,001565	76,663	-13,303	462,67
-90	0,064256	0,001578	53,454	-2,990	468,49
-85	0,09242	0,001591	38,116	7,394	474,36
-80	0,1301	0,001605	27,740	17,851	480,26
-75	0,17958	0,001619	20,568	28,389	486,19
-70	0,24343	0,001633	15,513	39,010	492,15
-65	0,32453	0,001648	11,884	49,722	498,12
-60	0,42606	0,001663	0,92346	60,529	504,1
-55	0,55149	0,001678	0,72705	71,438	510,09
-50	0,70456	0,001694	0,57933	82,453	516,08
-45	0,88927	0,001711	0,46674	93,582	522,06
-40	11,099	0,001728	0,37985	104,83	528,03
-35	13,708	0,001745	0,31203	116,21	533,98
-30	16,768	0,001764	0,25851	127,71	539,91
-25	20,328	0,001783	0,21586	139,36	545,81
-20	24,436	0,001802	0,18155	151,16	551,67
-15	29,147	0,001823	0,15371	163,11	557,48
-10	34,512	0,001844	0,13092	175,23	563,23
-5	40,588	0,001867	0,11214	187,52	568,91
0	47,430	0,00189	0,096529	200	574,51
5	55,095	0,001915	0,083477	212,67	580,03
10	63,642	0,001942	0,072488	225,55	585,43
15	73,132	0,001969	0,063179	238,65	590,72
20	83,624	0,001999	0,055248	251,98	595,86
25	95,183	0,002031	0,04845	265,56	600,84
30	10,787	0,002064	0,042594	279,41	605,62
35	12,176	0,002101	0,03752	293,55	610,19
40	13,690	0,00214	0,033103	308	614,49
-42,085	1,01325	0,001721	0,41339	100,12	525,54
45	15,339	0,002183	0,029237	322,8	618,5
50	17,129	0,00223	0,025836	337,97	622,14
55	19,067	0,002282	0,022828	353,56	625,35
60	21,163	0,00234	0,020153	369,62	628,03
65	23,425	0,002406	0,017758	386,25	630,07
70	25,863	0,002483	0,015599	403,54	631,29
75	28,489	0,002573	0,013635	421,66	631,43
80	31,315	0,002683	0,011822	440,89	630,08
85	34,356	0,002827	0,010112	461,79	626,47
90	37,635	0,003038	0,008415	485,7	618,75
95	41,188	0,003488	0,006396	519,05	598,59
Kritično stanje: $T = 273,15 + 96,7$ °C; $p = 42,48$ bar; $v = 0,004535$ m ³ /kg					
Referentno stanje: 0 °C ; $h = 200$ kJ/kg					

Unutarnja energija se računa iz izraza $u = h - pv$. Interpolacija je vršena na način da se kroz četiri okolne točke u odnosu na zadanu temperaturu povlači lokalno polinom trećeg stupnja, a također su derivacije du'/dT , du''/dT , dv'/dT i dv''/dT računane derivacijom toga lokalnog polinoma.

Uvrštavanjem izraza (9) i (10) u jednadžbe (7) i (8), uz zamjenu apsolutne temperature relativnom $\theta = T - 273,15$, one prelaze u oblike

$$\underbrace{\frac{dV_k}{dt} \left[\frac{u'}{v'} - \frac{u''}{v''} \right]}_{A_{11}} + \underbrace{\frac{d\theta}{dt} \left[\frac{V_k}{v'} \frac{du'}{dT} + \frac{V - V_k}{v''} \frac{du''}{dT} - \frac{V_k}{(v')^2} \frac{dv'}{dT} - \frac{V - V_k}{(v'')^2} \frac{dv''}{dT} \right]}_{A_{12}} = \underbrace{-q_m h'' + k A_p (\theta_0 - \theta)}_{B_1} \quad (11)$$

$$\underbrace{\frac{dV_k}{dt} \left[\frac{1}{v'} - \frac{1}{v''} \right]}_{A_{21}} + \underbrace{\frac{d\theta}{dt} \left[-\frac{V_k}{(v')^2} \frac{dv'}{dT} - \frac{V - V_k}{(v'')^2} \frac{dv''}{dT} \right]}_{A_{22}} = \underbrace{-q_m}_{B_2} \quad (12)$$

Uvažavajući oznake pojedinih članova u jednadžbama (11) i (12), one se mogu zapisati u eksplicitnom obliku po nepoznanicama V_k i θ

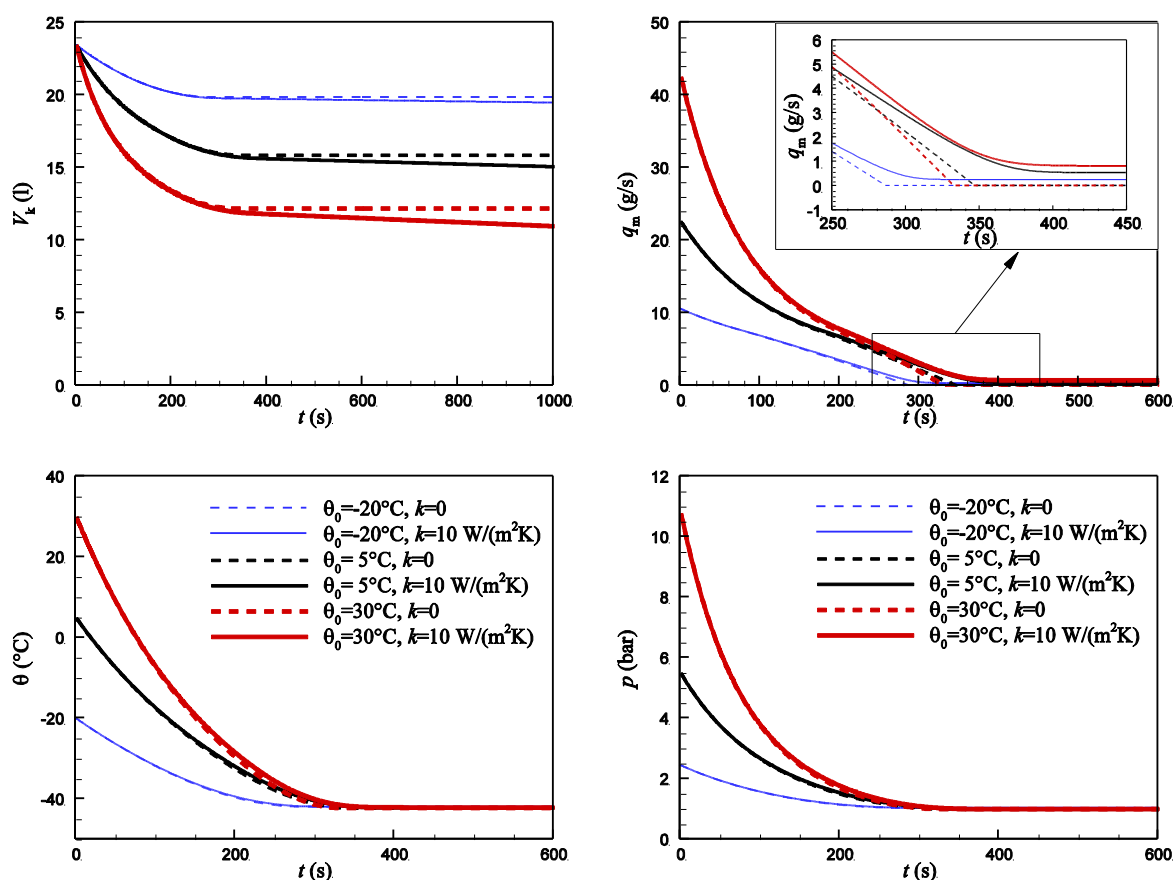
$$\frac{dV_k}{dt} = \frac{B_1 A_{22} - B_2 A_{12}}{A_{11} A_{22} - A_{21} A_{12}} \quad (13)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{B_2 A_{11} - B_1 A_{21}}{A_{11} A_{22} - A_{21} A_{12}} \quad (14)$$

Jednadžbe (13) i (14) se numerički integriraju u vremenu pomoću Runge-Kutta metode četvrtog reda točnosti, počevši od početnog trenutka ($t=0$), kada je $\theta=\theta_0$ i $V_k=V_{k0}$. Vremenski korak integracije je bio $\Delta t=0,5$ s.

3. Rezultati i diskusija

Analizirat će se brzina pražnjenja plinske boce koja je napunjena kapljevitom fazom u iznosu 95 i 50% ukupnog volumena pri različitim temperaturama okoline ($\theta_0 = -20, 0$ i 30°C) pri koeficijentu prolaza topline $k=0$ (adijabatski proces) i $k=10$ W/(m²·K). Slika 1 prikazuje rezultate proračuna za početnu napunjenost boce od 95 % (početni volumen kapljevite faze propana $V_0=23,5$ l), za tri različite početne temperature, za slučaj sa i bez izmjene topline između propana i okoliša.



Slika 1. Rezultati proračuna za početnu napunjenost boce kapljevitom fazom propana u iznosu 95% ukupnog volumena boce. Dijagram lijevo gore prikazuje promjene volumena kapljevite faze propana u vremenu, dijagram desno gore promjenu masenog protoka propana kroz ventil. Vremenske promjena temperature i tlaka u boci su prikazane u dijagramima dolje lijevo i dolje desno. Crtkane linije označuju slučajeve adijabatskog procesa, a pune linije slučaj izmjene topline s okolinom uz koeficijent prolaza topline $k=10 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$. Slučajevi najviše početne temperature su označeni crvenim debelim linijama, a slučajevi najniže početne temperature tankim plavim linijama. Značenje krivulja je na svim dijagramima isto.

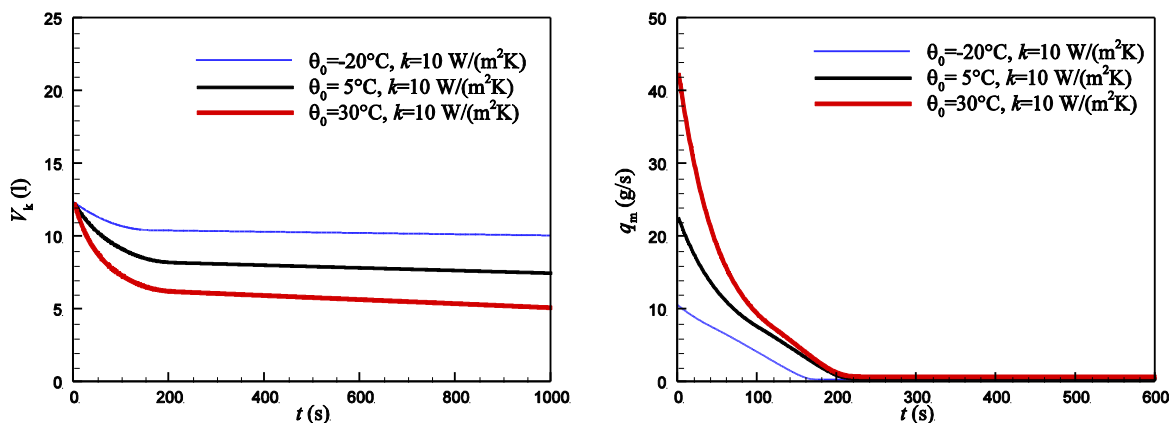
Iz slike 1 je očito da se pražnjenje boce odvija kroz dvije faze, početnog brzog pražnjenja, koja traje oko 350 do 380 s, ovisno o početnoj temperaturi, te naknadnog polaganog pražnjenja koje ovisi o brzini dovođenja topline propanu u boci i koje može trajati satima do potpunog ispražnjenja boce. U prvoj fazi, uslijed pražnjenja boce dolazi do naglog pada temperature i tlaka u boci, a kao posljedica pada tlaka i do smanjenja masenog protoka propana kroz ventil. U slučaju adijabatskog procesa (crtkane linije na slici 1), nakon što tlak u boci padne na atmosferski tlak dolazi do potpunog prekida strujanja, i stanje u boci se neće mijenjati ukoliko nema dovođenja topline izvana. Uz konstantni koeficijent prolaza topline, toplinski tok je također konstantan (s obzirom da je okolišna temperatura konstantna, te da ravnotežna temperatura propana također ostaje konstantna i pri atmosferskom tlaku iznosi oko -42°C). Uz konstantni toplinski, u drugoj fazi pražnjenja boce će se ustaliti konstantni maseni protok propana kroz ventil, a taj će protok biti veći, što je

toplinski tok jači. Tako bi za slučaj okolišne temperature od 30°C (temperaturna razlika koja definira toplinski tok je oko 72°C) maseni protok propana kroz ventil u drugoj fazi pražnjenja boce bio $q_{m2} = 0,81$ g/s, u slučaju okolišne temperature od 5°C $q_{m2} = 0,53$ g/s, a za temperaturu -20°C $q_{m2} = 0,248$ g/s (vidjeti detalj dijagrama gore desno na slici 1). Jasno je da će i početni tlak u boci ovisiti o početnoj temperaturi (pretpostavlja se da je boca u početnom trenutku bila u toplinskoj ravnoteži s okolišem), pa će pri višoj temperaturi biti i viši tlak u boci (vidjeti dijagram dolje desno na slici 1). Kod višeg početnog tlaka u boci, doći će i do većeg pražnjenja boce u prvoj fazi. Tako bi od početnog volumena kapljevite faze propana od 23,5 l, nakon prve faze pražnjenja ostalo $V_{k1} = 12,2$ l u slučaju početne temperature od 30°C, $V_{k1} = 15,9$ l u slučaju početne temperature od 5°C i $V_{k1} = 19,8$ l u slučaju početne temperature od -20°C (vidjeti dijagram gore lijevo na slici 1). Vrijeme druge faze potrebno za potpuno pražnjenje boce može se procijeniti iz formule

$$t_2 = \frac{V_{k1}}{v'q_{m2}}, \quad (15)$$

gdje je $v' = 0,00172$ m³/kg specifični volumen kapljevite faze propana pri atmosferskom tlaku (vidjeti tablicu 1). Tako bi u slučaj početne temperature od 30°C to vrijeme iznosilo $t_2 = 146$ min, u slučaj početne temperature od 5°C $t_2 = 296$ min, a u slučaju početne temperature od -20°C $t_2 = 774$ min.

Slika 2 prikazuje rezultate analogno gornjim dijagramima na slici 1, za slučaj početne napunjenosti posude 50% ukupnog unutarnjeg volumena boce. Rezultati su slični onima za napunjenost 95 % s jedinom razlikom da prva faza traje kraće, razmjerno smanjenju mase propana u boci.



Slika 2. Rezultati proračuna za početnu napunjenost boce kapljevitom fazom propana u iznosu 50% ukupnog volumena boce. Dijagram lijevo gore prikazuje promjene volumena kapljevite faze propana u vremenu, dijagram desno gore promjenu masenog protoka propana kroz ventil, sve za slučaj koeficijenta prolaza topline $k = 10$ W/(m²·K). Slučajevi najviše početne temperature su označeni crvenim debelim linijama, a slučajevi najniže početne temperature tankim plavim linijama.

Nakon završetka prve faze pražnjenja tlak u boci je neznatno veći od atmosferskoga, kao i u prethodnom slučaju, a maseni protoci kroz ventil u drugoj fazi pražnjenja su funkcija

toplinskog toka i jednaki su onima u prethodnom slučaju. Ukupno vrijeme potpunog pražnjenja boce je 78 min u slučaju početne temperature od 30°C, 154 min u slučaju početne temperature od 5°C, te 406,8 min u slučaju početne temperature od -20°C. Može se uzeti da je skraćanje ukupnog vremena pražnjenja boce razmjerno smanjenju početne mase propana u boci.

4. Zaključci

Pražnjenje plinske boce ispunjene propanom, nakon trenutnog otvaranja ventila odvija se u dvije faze. U prvoj fazi dolazi do naglog pada tlaka i temperature u boci, a kao rezultat toga do smanjenja masenog protoka kroz ventil. Količina propana koja isteče iz boce u toj prvoj fazi ovisi od početne temperature u boci (pri višoj početnoj temperaturi više će plina isteći iz boce u toj prvoj fazi). U drugoj fazi do istjecanja plina iz posude dolazi uslijed dovođenja topline propanu u boci, pri čemu veći toplinski tok uzrokuje veći maseni protok kroz ventil, tj. brže pražnjenje boce. Kad ne bi bilo dovođenja topline istjecanje plina iz boce bi prestalo nakon prve faze. Pri početnoj temperaturi od 30°C u prvoj fazi koja traje nekoliko minuta, isteče otprilike polovina sadržaja plina, a druga polovina isteče u drugoj fazi, koja traje preko dva sata. Kod početne temperature od -20°C, prva faza također traje nekoliko minuta i tijekom nje isteče svega 15-tak % početne mase plina, a ostatak isteče u drugoj fazi koja u slučaju početno pune boce traje preko 10 sati.

5. Literatura

- [1] Haque, A.; Richardson, S.; Saville, G.; Chamberlain, G. Rapid depressurization of pressure vessels // J. Loss Prev. Process Ind., 4(1990), 3; 4-7. (ISSN 0950-4230) **(rad u časopisu)**
- [2] Xia, J. L.; Smit, B. L.; Yadigaroglu, G. A simplified model for depressurization of gas-filled pressure vessels // Int. comm. heat mass transfer, 20(1993), 653-664. (ISSN 0735-1933) **(rad u časopisu)**
- [3] Zhou, Z.; Smith, B.; Yadigaroglu, G. A mathematical model and its analytical solution for slow depressurization of a gas-filled vessel // Journal of Engineering Mathematics, 31(1997), 1, 43-57. (ISSN 1573-2703) **(rad u časopisu)**
- [4] Zhou, Z. Thermal analysis of slow discharge from a pressurized natural gas storage tank // Applied Thermal Engineering, 17(1997), 11; 1099-1110. (ISSN 0140-6701) **(rad u časopisu)**
- [5] JANAF, Thermochemical tables, NSRDS-NBS-37, 1971.